

ヒステリシス電動機の同期脱出トルクに関する研究

著者	湧井 源二郎
号	86
発行年	1969
URL	http://hdl.handle.net/10097/11041

氏 名(本籍)	湧 井 源 二 郎(栃木県)
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 第 8 6 号
学位授与年月日	昭和44年11月5日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最 終 学 歴	昭和28年3月 東北大学工学部電気工学科卒業
学位論文題目	ヒステリシス電動機の同期脱出トルクに 関する研究
(主査)	
審 査 委 員	教 授 福島 弘毅 教 授 穴山 武 教 授 村上 孝一

論 文 内 容 要 旨

緒 言

ヒステリシス電動機は最近、理論解析、特性改善、設計、振動および騒音などほとんどすべての面から研究が行なわれ始めてきているが、本研究では主として従来不明であった基礎的な諸問題を明確にし、更に筆者の誘導した理論トルク式を基礎に、合理的な基礎設計の方法を提案した。また、やや系統的に特性の改善を行なった。

第1章 ヒステリシス電動機の基礎理論

ここでは第2章以下に述べる理論解析の準備として、交番ヒステリシス性に基づいた基礎理論を述べる。

まず、Teare が誘導した基本トルク式について考察し、次に非同期時、同期時の動作をトルク－速度特性上に直接表示する方法を用いて定性的に述べた。更に、空間高調波磁束および時間高調波磁束の出力におよぼす影響を重ねの理が成りたつという線形理論に基づいて考察した。

第2章 理論トルク式

ここでは第1章に考察したTeareの基本トルク式を出発点として、これを拡張して実際の電動機に適用するのに便利な理論トルク式を誘導し、二、三の例について測定値と計算値の比較を行なって、理論トルク式の妥当性を確めた。この式の特徴を列举すると次の通りである。

- (i) 回転子リングの磁気定数として空間的分布に対する複素透磁率を定義し、これを導入した。
- (ii) 回転子の磁気特性の非直線性を基本波磁界および高調波磁界に対し、2種の複素透磁率で代表させて取扱った。この方法は簡単かつ妥当性のある便法といえる。
- (iii) 理論トルク式の磁気定数を決定するのに、基本波分は磁界がおおよそ交番ヒステリシス性であることから、直流ヒステリシス・ループにより決定し、高調波分は磁界がほぼ完全な回転ヒステリシス性でかつ多数存在することから、高調波磁気定数を決める簡便な方法として、同期脱出トルクの計算値と測定値を比較して決める方法をとった。
- (iv) ヒステリシス電動機の出力は空間高調波磁束の影響によりかなり減少する。この高調波発生の原因としては二つが考えられるが、これらを十分考慮した理論トルク式を求めた。
- (v) 得られたトルク式は固定子電流および巻線配置、機械的寸法比、回転子磁気定数などの関数として直接表示されておるので、これらのものが変化した場合に出力トルクにどのように影響するかを定量的に、しかも比較的簡単に把握することができる点に特徴がある。

第3章 電動機構造の出力に及ぼす影響

ここでは第2章で誘導した理論トルク式を基礎に、電動機の巻線配置、機械的寸法およびスロット形状の変化に対し出力がどのように変るかを理論的に広範囲に考察し、更に設計面から最適な機械的寸法比およびスロット形状の選定を行ない、これに実験的な裏付けをした。ここで明らかにされた主要な点を列举すると次のとおりである。

- (i) 近似トルク式(2.82)の適用限界について定量的に考察した。また、高調波トルクはかなり簡略化して取扱いよいことがわかった。
- (ii) T_{rp1}/T_{p1} , T_{ep1}/T_{p1} (T_{rp1} , T_{ep1} : 磁界の強さの半径方向成分および円周方向成分によるトルク, T_{p1} : 合成トルク)は、リングの厚さ r_2/r_1 (r_2 , r_1 : 回転子の外半径および内半径), 極対数 p , リングの誘磁率およびヒステリシス角で決まることを明らかにした。

(iii) 高調波トルクのうち、有力なのはスロット高調波であり、その他の高調波は近似的に無視できることを明らかにした。また、実際のトルク計算にあたっては比較的低次のスロット高調波まで考慮すれば十分であることがわかった。

(iv) スロットの形状 n_1 ($\simeq (te - o) / o$ なる整数, te : 歯ピッチ, o : スロット開口の幅) をトルク式に導入することによって、ギャップ・パーミアンスの不均一に基づく高調波の影響をはじめて定量的に考察し、ヒステリシス電動機では一様ギャップが望ましいこと、またスロット付固定子の場合には最適な値として $n_1 \simeq 3 \sim 4$ が求められた。

(v) ギャップの長さ r_3 / r_2 (r_3 : 固定子内半径) については、一様ギャップおよびスロット付固定子いずれの場合にも一般に最適な r_3 / r_2 の値があることを明らかにし、若干の試料電動機について理論的に選定し、これに実験による裏付けを行なって妥当なことを確めた。

(vi) 固定子巻線配置に基づく高調波の影響 q (q : 1極1相あたりのスロット数) できまり、これはできるだけ多いのが望ましいが、一応 $q \geq 2$ であれば十分なこと、 $q = 1$ だけは避けるべきである。

(vii) リングの厚さ r_2 / r_1 に対する出力トルクの関係を広範囲に考察し、最適な r_2 / r_1 の値は $T'c$ と $t'c$ ($T'c$: アンペア導体数一定の場合のトルク, $t'c$: 単位体積当りの $T'c$ で一様ギャップの場合) あるいは $T'o$ と $t'o$ (同じく、スロット付の場合) がともに大きくなる条件から求めるべきであることを提案した。この方法は電動機の効率(同期脱出時)ならびにリングの利用効率の両方を合せ考慮したもので合理的な一方法と考えられる。

なお、若干の試料電動機について、最適な r_2 / r_1 の値を理論的に求め、これに実験的な裏付けを行なって、この方法が妥当であることを確めた。

第4章 ヒステリシス電動機の特性改善

ヒステリシス電動機も小形、大出力、高効率が要求されることは他種の電動機とまったく同様であり、これを実現するために色々の方法が考えられるが、筆者は特性改善の方法からこれを4種類に分け、おのおのについて筆者の考案による試作電動機の測定結果を述べた。

(i) 空間高調波磁束を除去する方法

ヒステリシス電動機は空間高調波磁束の影響により出力が非常に減少する。したがって空間高調波磁束を除去することにより、かなり改善できる。筆者はこれを実現する簡便な方法としてけい素鋼板(大きさ $1.5 \times 2.6.5$ mm)をスロット内のフェイバー製のくさびの上に張り付けて、一様ギャップに近い構造とした。試料電動機についての測定結果から、この方法が一様ギャップにかなり近くなることがわかった。

(ii) 回転子表面に導電性大なる金属メッキを行なう方法

回転子表面に導電性大なる金属メッキを施すと、電流により非同期時の出力トルクが改善できることが予想できる。ここでは試料回転子の表面に 0.01 mm と 0.025 mm の銅メッキを行なった。メッキをしない場合とした場合を比較するとメッキ厚さ 0.025 mm で約 30% , 0.01 mm で約 16% , それぞれ始動トルクが増加している。

また、メッキすることにより同期脱出トルクも改善できることがわかった。これは空間高調波磁束がメッキ部分に流れる電流によって阻止され、リング中を通過する高調波磁束が小さくなるためと考えられる。

(iii) 永久磁石による励磁を付加する方法

筆者は回転子リングに極数と同数のすり割りをもうけて、リングの永久磁石による普通の同期電動機としてのトルクがヒステリシス・トルクに加わるようにした。このようにすり割りをもうけることにより、これがない場合に比較して定格電圧の場合で同期脱出トルクが 1.9 倍に、効率が 1.4 倍に増加した。

(iv) コンデンサ分相電動機を矩形波電源で運転する方法

ここではコンデンサ分相電動機を矩形波電源で運転すると、正弦波電源で運転した場合に比較して同期脱出トルクは増加し、入力電流は減少し、効率はかなり増加することがわかった。

また、このように特性が改善されるのは時間高調波の影響であることも明らかとなった。

第5章 回転子リングの磁気特性と電動機特性との関係

本章では回転子リングの最適な磁気特性を選定する実際的な方法を提案した。そして音響機器用の数 $W \sim 20\text{ W}$ 程度の電動機を対象に最適な磁気特性を選定し次の結果を得た。

- (i) 1極1相あたりのスロット数 q が2以上の場合には $B_r = 8 \sim 9\text{ KG}$ の磁石で $H_c = 120 \sim 1600\text{ e}$ 程度が最適であることがわかった。
- (ii) q が1の場合には $B_r = 8 \sim 9\text{ KG}$ のものでは、 H_c が大きいものほどよいが、実際の選定では $H_c = 200 \sim 2200\text{ e}$ 程度が適当であろう。また、この場合には入力電流は回転子リングの磁気特性に関係なく、主としてギャップ・リアクタンスで定まることも明らかとなった。
- (iii) 高調波磁界の出力トルクに及ぼす影響はヒステリシス・ループ形状が矩形に近くなるほど大きくなることがわかった。

第6章 ヒステリシス電動機における交番ヒステリシスと回転ヒステリシス

本章では電動機の動作が回転子の交番ヒステリシス性に基づくか、回転ヒステリシス性に基づく

かを検討し、次の点を明らかにした。

- (i) 回転ヒステリシスを交番ヒステリシスと比較しながら、その相違点を明らかにし、また磁気飽和と共に回転ヒステリシス損が零になる機構を定性的に考察した。
- (ii) 回転子リング内のベクトル磁界分布は基本波、高調波ともに一般に楕円回転磁界となる。これは一つの円回転磁界と一つの交番磁界とに分解できる。したがって、電動機の動作は一般に交番ヒステリシス性と回転ヒステリシス性の双方に依存する。
- (iii) 音響機器、VTR用などの電動機では基本波については円回転磁界（したがって回転ヒステリシス性）の占める割合は20%以下で大部分は交番磁界（したがって交番ヒステリシス性）である。
- (iv) 更に基本波磁界は回転子リングが磁気飽和に近づくにつれて、逆に円回転磁界（したがって回転ヒステリシス性）の占める割合が大きくなり、飽和すると完全に回転ヒステリシス性となることを理論的に明らかにし、更に試料電動機の測定により、実験的な裏付けを行なった。
- (v) また、高調波については磁気飽和している、いないにかかわらず大部分が円回転磁界で交番磁界の占める割合はかなり小さく、特に有力な高調波であるスロット高調波はほぼ完全な円回転磁界（したがって回転ヒステリシス性）となる。
- (vi) 回転子リング用のアルニコ系材料について回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損を測定して比較、考察した。

結

言

以上、各章においてヒステリシス電動機に関する基礎研究の成果を述べてきたが、得られた成果を要約すると

- (i) Teareの基本トルク式を拡張して、実際に適用するのに便利な形で理論トルク式を求め、これを基礎に機械的寸法、巻線配置などを決定する合理的な一方法を提案し、若干の例について決定してこれに実験的裏付けをした。
- (ii) 回転子の最適な磁気特性選定の一方法を提案し、更に高調波磁界の出力トルクに及ぼす影響を考察した。
- (iii) 特性改善に対する種々の考察を行なった。
- (iv) 普通の電動機構造のものでは回転子内の磁界は基本波は大部分が交番ヒステリシス性で回転ヒステリシス性の占める割合は小さく、また、高調波はほぼ完全な回転ヒステリシス性であることがわかった。

謝

辞

本研究は著者が昭和 32 年に岩手大学工学部電気工学科に赴任したときに始まる。この間、御指導、御鞭撻を戴いてきた岩手大学故草刈遜教授に対し、厚く御礼申し上げる次第である。また、東北大学菊地正教授には研究に関して御意見を賜り、研究の目標を示して戴いたが、これは著者の永く忘れ得ぬところであり、教授の御指導に改めて敬意と感謝を捧げる次第である。また、本論文をまとめるにあたっては、更に東北大学の福島弘毅教授、穴山武教授、村上孝一助教授の御指導を戴いた。深く御礼申し上げます。

更に試作、実験に御協力戴いたソニー株式会社、東北金属株式会社の関係各位並びに当研究室に所属して、卒業研究を行なった多くの卒業生ならび研究室の諸君に厚く御礼申し上げます。次第である。

審 査 結 果 の 要 旨

ヒステリシス電動機は最近音響機器などに多量に用いられるに至ったが、その設計理論に関しては従来見るべき研究がなされていない。

著者は十数年にわたる研究の結果、出力トルクに関する詳細な理論式を導き、実験的にその妥当性をたしかめ、この種電動機の設計製作に有効な指針を与えた。

本論文はその成果をまとめたもので、6章よりなっている。

第1章はTeareの理論式の紹介と、空間および時間高調波磁束の影響についての定性的説明で、本論文の出発点を与えている。

第2章においては上記の理論式を基本波と高調波に対する二つの複素透磁率を用いて線形化し、ラプラスの式から磁束分布を求め、実際の電動機に適用しやすいトルクの基本式を得ている。

第3章は固定子起磁力、電動機各部の寸法比などが出力トルクに及ぼす影響を上記基本式を基として論じたものである。スロット高調波が最も特性を劣化させるものであつて、歯幅をスロット開口の3～4倍とすること、および1極1相当りのスロット数は少くとも2個以上とすべきことを見出している。また空隙長および回転子リングの肉厚にはそれぞれ最適値が存在することを明らかにした。これらの結果は数個の試作電動機を用いて実験的にも確認しているが、実際の設計に当って極めて有益な知見というべきである。

第4章ではヒステリシス電動機の特性を改善するための2、3の考案を述べている。磁気くさびを設けて空間高調波を軽減すること、うず電流トルクを増すため回転子に金属メッキすること、回転子にすり割を入れて永久磁石励磁を加味すること、およびコンデンサ分相形を矩形波電源で駆動することはいずれも実用上有効な着想である。

第5章は回転子材料の磁気特性の影響を述べたものである。微分透磁率が基本波透磁率にくらべてあまり小さくない材料を選ぶべきことを見出している。

第6章は電動機動作の基本となる回転子のヒステリシスを論じたものである。基本波分に対しては主として交番ヒステリシスと考えてよいが、高調波分に対しては回転ヒステリシスを考えねばならぬことを指摘しているのは卓見である。

以上を要約すると本論文はヒステリシス電動機の特性を解明し、詳細な基本式を導き、設計に合理的基盤を与えたもので、電気工学上寄与するところ極めて多い。

よって工学博士の学位論文として合格と認める。